

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ДРОБОВОГО БУРЕНИЯ

В. И. МОЛЧАНОВ

Данная статья написана по результатам двухлетних исследований бурового процесса, выполненных в производственных и лабораторных условиях бригадой института. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментального бурения летом 1952 и 1953 гг. и в обработке всех полученных наблюдений. В нашем распоряжении в настоящее время имеются материалы по 320 рейсам-наблюдениям, проведенным летом 1952 г., по 200 рейсам-наблюдениям лета 1953 г. и по лабораторным исследованиям, составляющим примерно 100 рейсов-наблюдений.

Кроме материалов автора, в статье использованы результаты наблюдений, выполненных в отрядах, работавших под руководством П. М. Лопушинского и П. Ф. Пальянова.

Основной задачей исследований являлась разработка рациональной технологии дробового бурения применительно к конкретным условиям. Оптимальный технологический режим должен вырабатываться на базе глубокого изучения процесса разрушения породы и влияния на этот процесс основных факторов. Режим дробового бурения в первую очередь должен характеризоваться следующими параметрами:

- 1) давлением на забой,
- 2) числом оборотов коронки,
- 3) способом питания и дозировкой дробы,
- 4) количеством промывочной жидкости.

Выработанный режим наряду с повышением производительности должен обеспечивать хороший выход керна.

Методика полевых и лабораторных исследований

На буровой экспериментальной вышке в составе смены находился хронометражист, который фиксировал все операции, связанные с подготовкой к бурению, а во время бурения через каждые 30 минут снимал следующие показания:

- 1) углубку за 30 минут чистого бурения,
- 2) показания водомера,
- 3) показания амперметра и вольтметра.

Перед спуском инструмента и после подъема хронометражист замерял внутренний и наружный диаметр коронки, общую высоту и высоту прорези коронки.

Давление на забой, число оборотов шпинделя, норма и способ засыпки дробы задавались сменному мастеру в соответствии с общим планом исследований. На хронометражиста возлагались обязанности надзора за соблюдением заданных параметров; им же производились необходимые вычисления по определению веса снаряда и необходимой нагрузки на рычаг или на регулятор Волкова.

Общий план экспериментального бурения строился с целью последовательного исследования влияния на скорость углубки отдельных параметров режима. При неизменности условий бурения и постоянстве прочих параметров изменялось давление на коронку. В 1952 г. неизменный режим выдерживали 9 смен, после чего только давление на коронку изменяли ступенью на 5 кг/см^2 и новый режим выдерживали 9 смен. Так исследовался диапазон от 10 до 30 кг/см^2 , а при 90 об/мин—до 40 кг/см^2 .

Такая методика оправдывает себя только в условиях очень медленной углубки скважины и однородности геологического разреза. Наблюдения, перенесенные на график в координатах „скорость углубки—давление на коронку“, дают отчетливую картину этой зависимости, полученную для разных чисел оборотов (фиг. 1). Воспользоваться этим графиком для изучения влияния числа оборотов коронки на скорость углубки совершенно невозможно, так как кривые несопоставимы между собой. Исследования влияния давления при 90 об/мин продолжались 36 станко-смен. За это время пробурено около 11 метров, изменен диаметр скважины, и сопоставление скоростей углубки при 90 и 150 об/мин теряет всякий смысл.

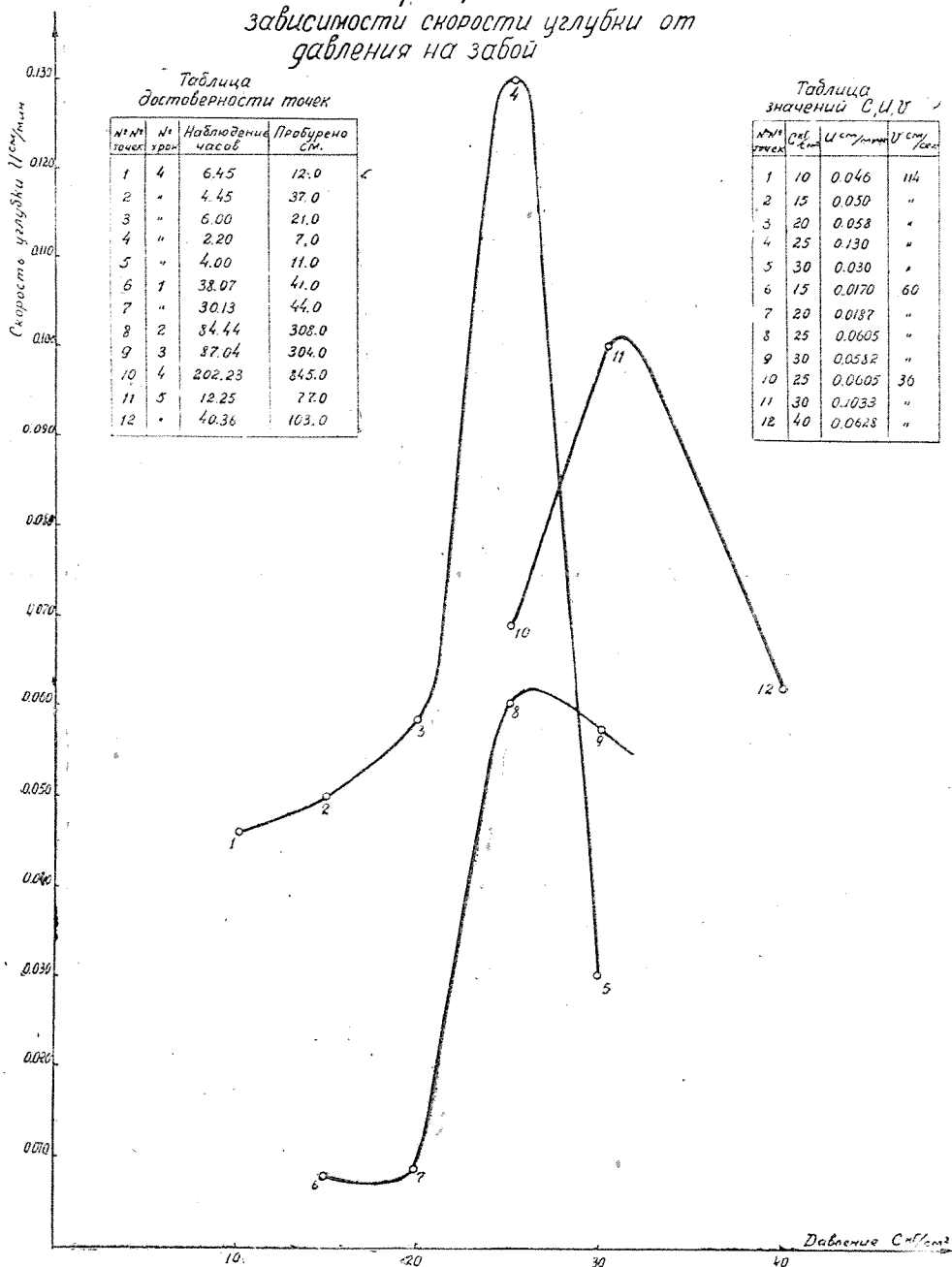
Из рассмотрения этих графиков был сделан вывод о зависимости оптимального давления от числа оборотов при прочих равных условиях (при 90 об/мин $C_{\text{опт}} = 32 \text{ кг/см}^2$; при 150 об/мин $C_{\text{опт}} = 28 \text{ кг/см}^2$; при 240 об/мин $C_{\text{опт}} = 25 \text{ кг/см}^2$). Это закономерное убывание оптимального давления нами было поставлено в прямую связь с крутящим моментом и мощностью мотора. Исходя из этих соображений, методика исследований в 1953 г. была несколько изменена. Определенное сочетание параметров выдерживалось только один рейс. Следующий рейс (иногда в той же смене) проходил при тех же параметрах режима, но на другом двигателе. Следующая пара рейсов протекала уже при другом давлении на коронку. Серия опытов считалась законченной после получения парных рейсов-наблюдений на всех ступенях давлений—от 20 до 35 кг/см^2 . Следующая серия таких же наблюдений протекала при другом числе оборотов коронки. Изменение методики вполне оправдало себя. Две соседние серии настолько сближены между собой, что сопоставление их вполне допустимо. Следовательно, пользуясь графиками, изображенными на фиг. 2, 3, 4, 5 и 6, как исходным материалом, мы имеем право строить график зависимости скорости углубки скважины от числа оборотов коронки.

Методика исследования влияния других параметров (способа питания дробью, промывки и т. д.) на скорость углубки в настоящей статье не излагается.

Лабораторные исследования проводились в основном по той же методике. Исследования проводились на учебной буровой вышке, оснащенной станком КА-2М-300 при глубине скважины около 50 м, и на специально оборудованном сверлильном станке. Учебная буровая вышка имеет самое обычное оснащение, и на описании его останавливаться нет смысла. Так как основные выводы основываются на результатах стендового бурения, проведенного на сверлильном станке, на оборудовании последнего и на методике исследований следует остановиться особо. В шпинделе сверлильного станка с помощью обычного конуса закреплялся сальник, к которому присоединяется дробовая коронка. Бурение производится в глыбе породы, высотой около 1 м. По мере углубки скважины наращиваются 33-миллиметровые штанги. Бурение производится коронками, изготовленными из штанг диаметром $D = 50 \text{ мм}$, самой мелкой дробью („репс“) или просеянной дробью диаметром $D = 1,5 \text{ мм}$.

Промывка осуществляется с помощью водяной помпы от двигателя А-22, имеющей индивидуальный электропривод. Вращение станка производится от электромотора мощностью 7,8 квт. Электросхема стенда состоит из полного комплекта электроизмерительных приборов.

График зависимости скорости углубки от давления на забой

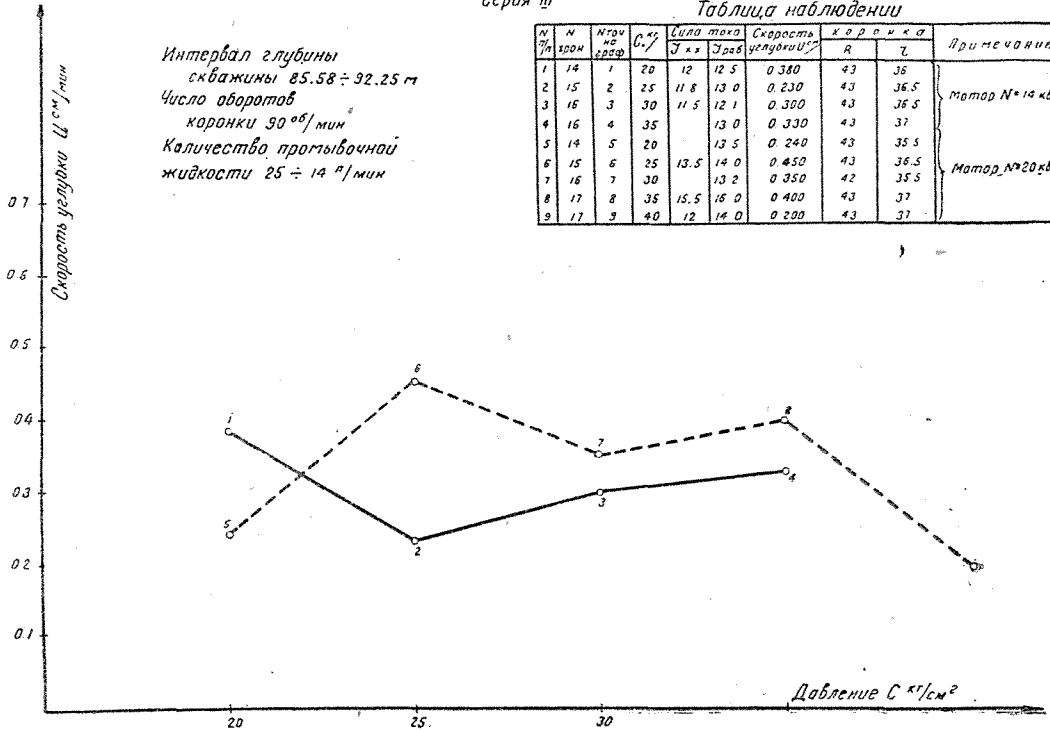


Фиг. 1

Серия III

Таблица наблюдений

N г/г	N г/г	N г/г	C г/г	Сила тока		Скорость угловой U град	короткая		Примечание
				Эк	Эк		А	Г	
1	14	1	20	12	12.5	0.380	43	36	Мотор N=14 кВт
2	15	2	25	11.8	13.0	0.230	43	36.5	
3	16	3	30	11.5	12.1	0.300	43	36.5	
4	16	4	35		13.0	0.330	43	37	
5	14	5	20		13.5	0.240	43	35.5	Мотор N=20 кВт
6	15	6	25	13.5	14.0	0.450	43	36.5	
7	16	7	30		13.2	0.350	42	35.5	
8	17	8	35	15.5	16.0	0.400	43	37	
9	17	9	40	12	16.0	0.200	43	37	

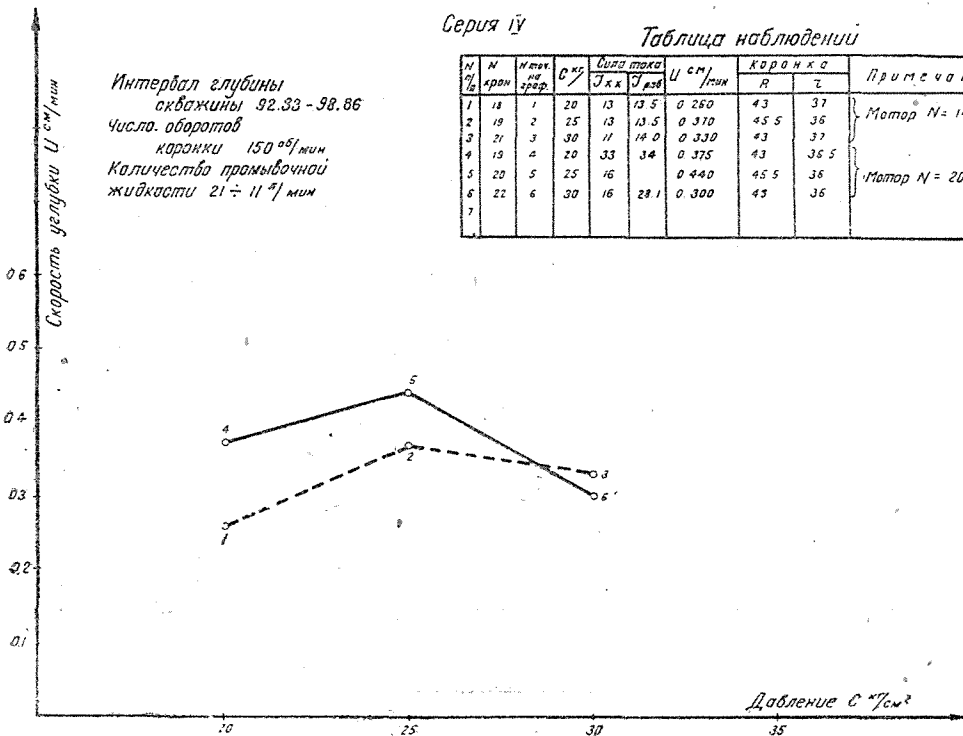


Фиг. 2

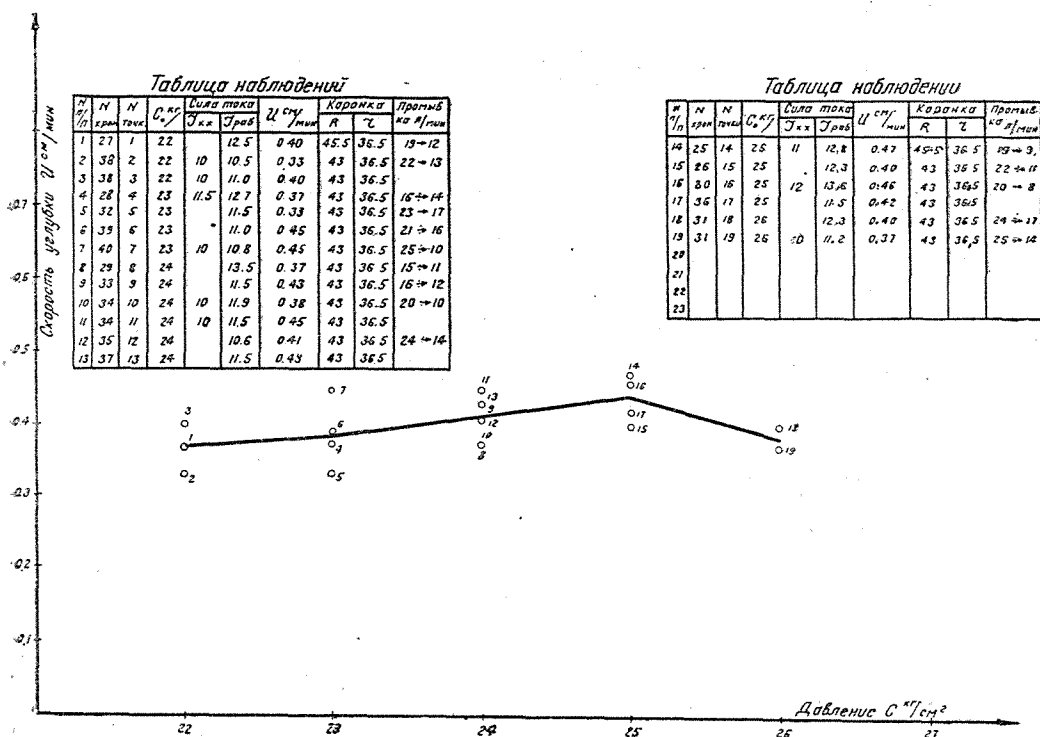
Серия IV

Таблица наблюдений

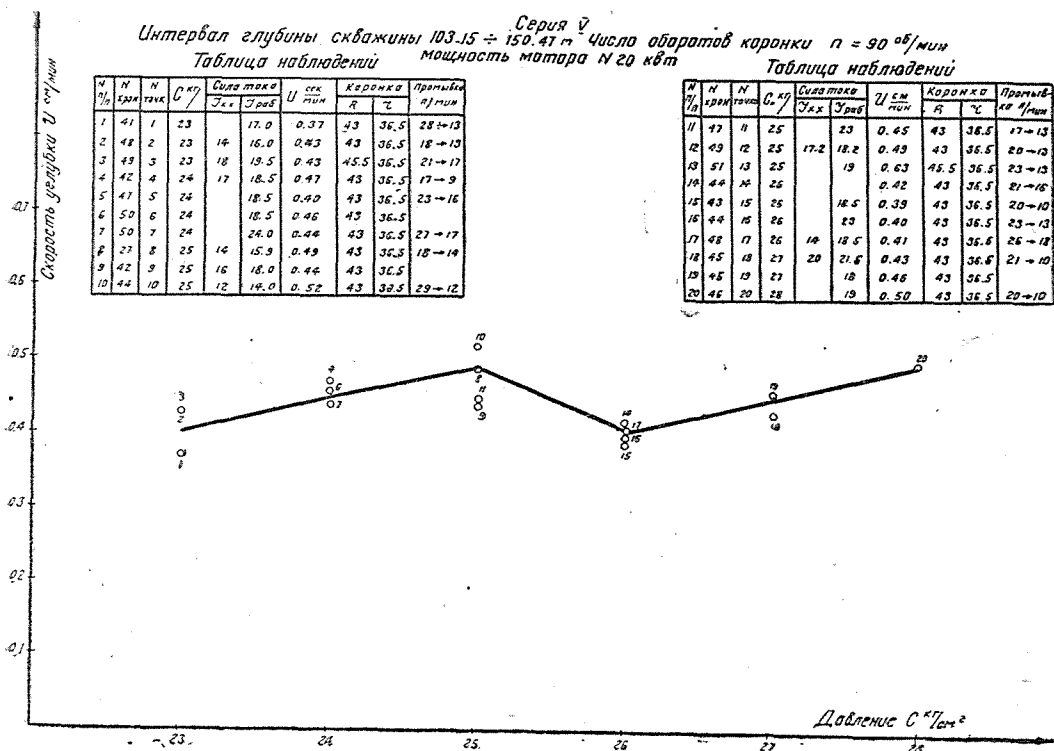
N г/г	N г/г	N г/г	C г/г	Сила тока		U г/г	короткая		Примечание
				Эк	Эк		А	Г	
1	18	1	20	13	13.5	0.260	43	37	Мотор N=14 кВт
2	19	2	25	13	13.5	0.370	45.5	36	
3	21	3	30	11	14.0	0.330	43	37	
4	19	4	20	33	34	0.375	43	36.5	
5	20	5	25	16		0.440	45.5	36	Мотор N=20 кВт
6	22	6	30	16	28.1	0.300	45	36	
7									



Фиг. 3

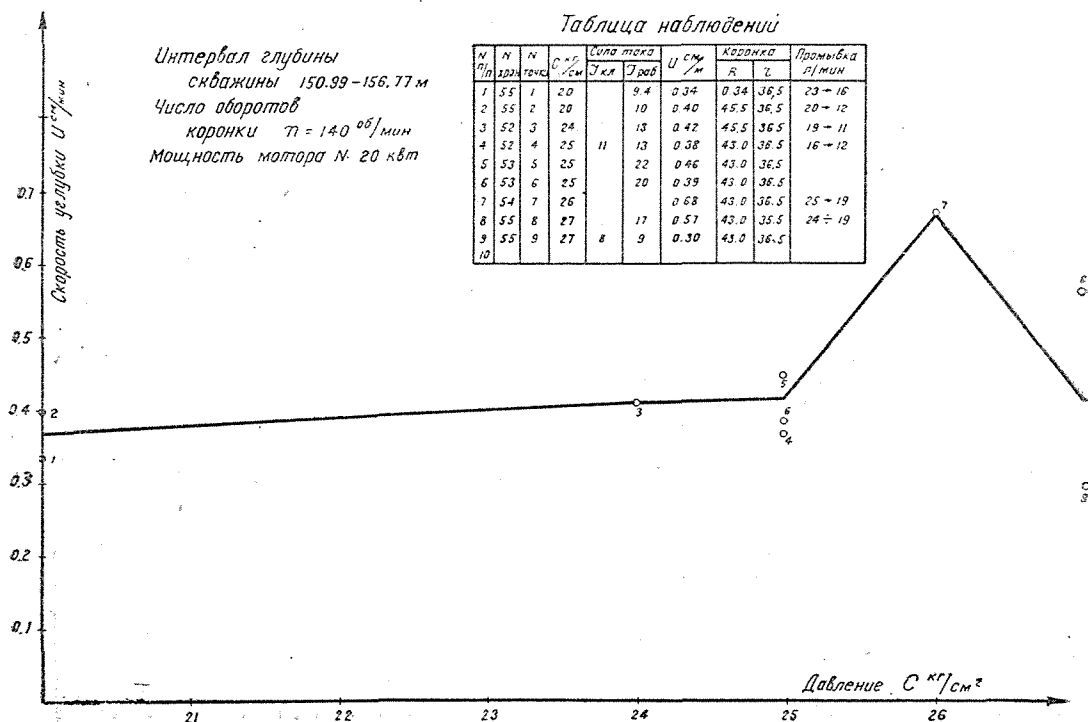


Фиг. 4



Фиг. 5

Опытное бурение протекало следующим образом. Глыба породы устанавливалась и крепилась под шпинделем станка. Забурка скважины производилась победитовой коронкой диаметром $D=55$ мм. После углубки на 2—3 см переходили на дробовое бурение. Эксперименты начинались после того, как скроется магазинная прорезь коронки. Перед началом экспериментального рейса в скважину засыпалась порция дробы весом 50 г. Дробовая коронка тщательно замерялась, вычислялась рабочая площадь торца коронки, коронка взвешивалась, вес коронки прибавлялся к весу прочих частей инструмента и определялся вес груза, необходимого для создания нужного давления на забой. Давление на забой осуществлялось через регулятор Волкова. Бурение при данном сочетании параметров продолжалось до получения пяти одинаковых отсчетов скорости углубки, снимаемых через



Фиг. 6

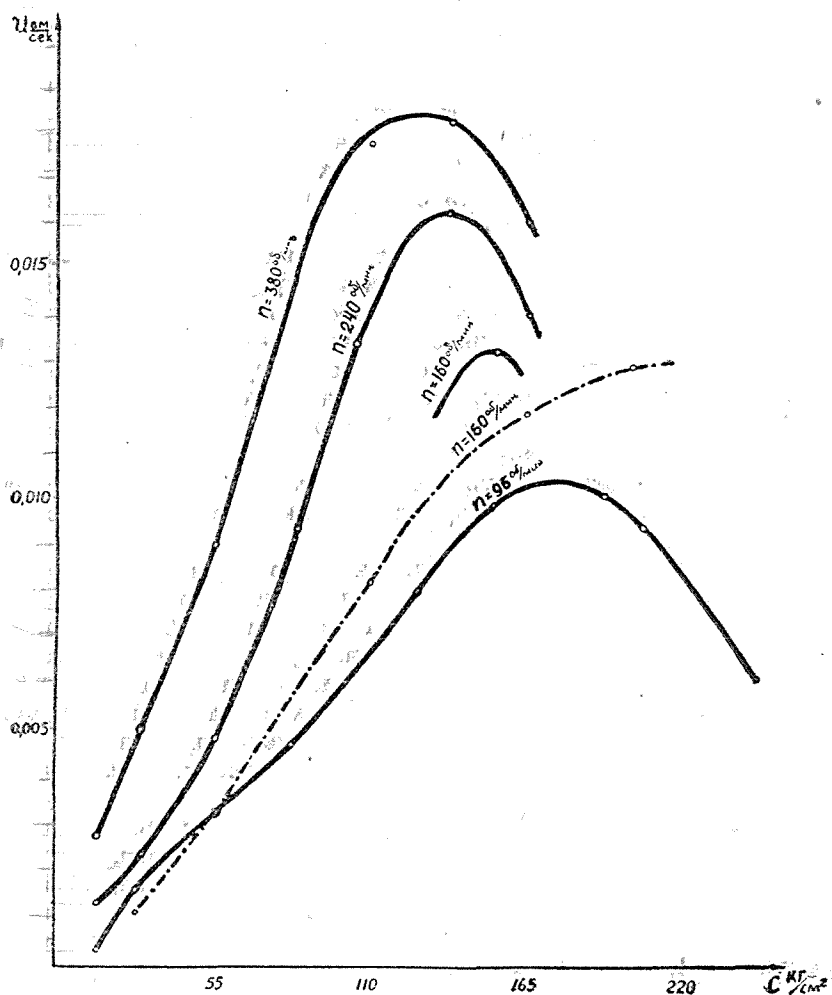
5 минут чистого бурения. Перед началом бурения в середине и в конце рейса определялась мощность холостого вращения инструмента. Во время бурения через те же 5 минут записывалась мощность рабочего хода. Мощность, затрачиваемая на бурение, определялась как разность между мощностью при бурении и мощностью холостого хода.

Пользуясь данной методикой, сняты зависимости скорости углубки от давления на коронку при различных числах оборотов (фиг. 7) и выявлена зависимость скорости углубки от числа оборотов при оптимальных для каждого числа оборотов давлениях.

О характере работы дробы

На механизм разрушения породы при дробовом бурении в настоящее время нет единого взгляда. Гипотетически возможны три рода воздействия дробы на породу.

1. Резание, строгание остроугольными мелкими, но бесчисленными „резцами“—осколками дробы, которые лишь кратковременно закрепляются в торце коронки и непрерывно изменяют свою форму и положение. В случае такого воздействия намечается некоторая аналогия между дробовым бурением и резанием материалов резцами.



Фиг. 7

2. Раздавливание породы круглой дробью под действием нагрузок, превышающих предел прочности породы на сжатие. При вращении инструмента и перекачивании дробы раздавливающие нагрузки перемещаются по кольцу забоя, производя полезную работу бурения. В случае такого воздействия намечается аналогия между дробовым бурением и износом колец подшипников качения.

3. Выкрашивание породы под действием ударных скалывающих сил, возникающих при качении тел не шаровой формы по неровной поверхности при больших нагрузках. Процесс разрушения протекает аналогично такому при бурении шарошечными долотами или при таком ударном бурении, когда бур поворачивается одновременно с ударом.

В специальной литературе по дробовому бурению излагается первая или вторая гипотеза. Основное расхождение между этими гипотезами заключается в двух вопросах:

- а) работает колотая или круглая дробь?
- б) работает резанием или раздавливанием?

В ходе дискуссии, протекавшей в 1941 г. на страницах журнала „Разведка недр“, выяснилось следующее: первая гипотеза несостоятельна, во-первых, потому, что предполагает удовлетворительную работу „резцов“ из чугуна в таких породах, в которых резцы из твердых сплавов работают неудовлетворительно; во-вторых, для того, чтобы „резец“ перемещался по породе, необходимо наличие силы трения в месте соприкосновения коронки с частицами дробы значительно больше, чем сила трения при скольжении частиц дробы по породе. Иными словами, коэффициент трения при скольжении стали по чугуну должен быть больше, чем при скольжении чугуна по породе, что противостоит естеству.

Против второй гипотезы говорит целый ряд фактов. Во-первых, при бурении чугунной дробью круглые дробинки существуют на забое очень недолго (до двух часов) и только после того, как вся дробь расколется под торцом коронки, начинается интенсивная углубка скважины. Во-вторых, если допускать в породе такие высокие концентрации напряжений, которые приводят к разрушению породы, то, очевидно, столь же высокие напряжения будут иметь место и в дробе, а чугун большей частью менее прочен, чем порода, и разрушится в первую очередь.

Автор стоит на позициях третьей гипотезы и считает, что разрушение породы под торцом дробовой коронки протекает следующим образом в зависимости от качества дробы.

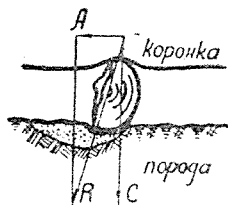
1. Бурение чугунной дробью. Чугунная дробь не является шаровой в геометрическом смысле этого слова и перекачивается при вращении коронки по неровной поверхности забоя. При этом неизбежно возникают „биения“ снаряда, вибрация его и ударные нагрузки будут передаваться через дробь на породу, отчего и дробь, и порода будут крошиться. Перекачиваемые остроугольные частицы создадут более благоприятные условия для возбуждения колебаний снаряда и для разрушения породы своими острыми ребрами (фиг. 8). Необходимо отметить, что колебания снаряда будут двух родов: осевые и крутильные.

На каждую частицу дробы действуют две силы: сила давления на коронку, ориентированная по нормали к забою, определяющая силу, стремящуюся внедрить частицу дробы в породу, и сила трения, действующая в плоскости забоя и стремящаяся оторвать часть породы, примыкающей к дробинке. Совместное действие этих сил можно рассматривать как удар, направленный под некоторым углом к поверхности забоя. Остроугольные частицы, получающиеся при раскалывании чугунной дробы, интенсивно разрушают породу при сравнительно небольшом давлении на коронку, одновременно с этим вследствие невысокой прочности чугуна быстро изнашиваются сами. Выгодно ориентированная частица под действием удара произведет разрушение породы и, вероятно, раскрошится сама на более мелкие, но также остроугольные частицы, и на забое всегда будет достаточное количество „дробинок“, выгодно ориентированных по отношению к забою и коронке.

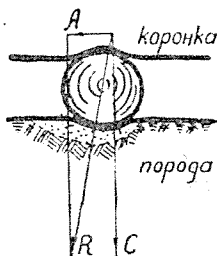
2. Бурение стальной шаровой дробью. В основных чертах процесс протекает аналогично только что описанному с той лишь разницей, что горизонтальная составляющая удара невелика, инструмент тупой и можно сказать, что разрушение породы идет под действием тупого инструмента при направлении ударов почти по нормали к поверхности забоя (фиг. 9). Очевидно, для достижения заметного разрушения породы сила „С“ должна быть очень велика, а производительность такого бурения, в общем, весьма незна-

чительная. Подтверждение этого можно найти в опытах Боровского Е. В. [1] и Остроушко И. А. [9].

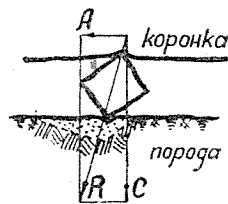
3. Бурение стальной сечкой. Общая схема действия сил остается неизменной (фиг. 10), но процесс существенно отличается и от первого, и от второго. Сечка поступает на забой в виде, готовом для работы, имея острые ребра, и сразу дает эффективную углубку. Сечка изготавливается из высококачественной стали и довольно долго сохраняет свои острые ребра при той же крупности частиц, что и является причиной высокопроизводительной работы ее. По мере обкатки характер работы сечки приближается к характеру работы круглой дроби, сечка постепенно теряет свои буровые свойства, и скорость углубки скважины падает.



Фиг. 8

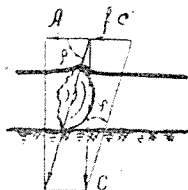


Фиг. 9

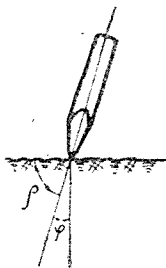


Фиг. 10

Процесс бурения существенно отличается в зависимости от вида истирающего материала, но общим началом для всех трех является разрушение породы под действием косо направленного удара. Рассмотрим силы, приложенные к элементарной частице (фиг. 11).



Фиг. 11

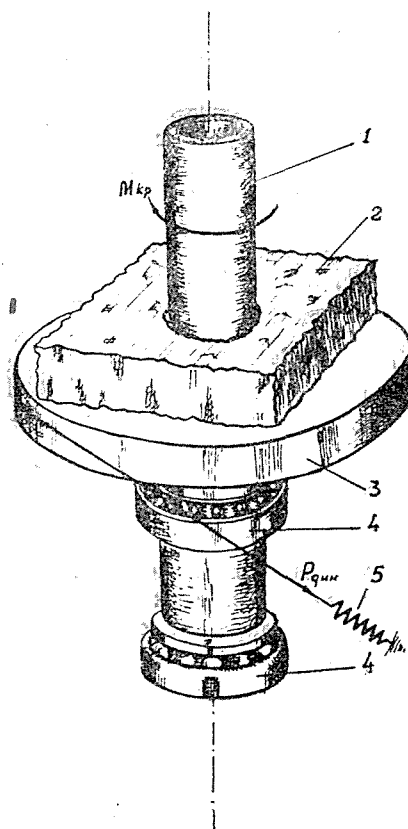


Фиг. 12

Согласно закону Кулона, сила сопротивления относительно перемещению соприкасающихся тел определяется $P = F_{тр} + A$, где $F_{тр} = fC$ — сила трения (f — коэффициент трения, C — сила нормального давления), A — сцепленность трущейся пары [8].

Горизонтальная составляющая силы косо удара определяется вторым слагаемым (сцепленностью). Наблюдения над работой зубила при обработке поверхности позволили сделать вывод, что максимальная сцепленность и наибольшее разрушение породы получается при угле наклона зубила $\rho = 90 - \varphi$, где φ — угол трения между материалом зубила и обрабатываемой поверхностью (фиг. 12). Действительно, если приходится обрабатывать идеально гладкую поверхность при полном отсутствии трения между инструментом, то единственное направление зубила, которое может вызвать разрушение, — по нормали к поверхности ($\varphi = 0$ и $\rho = 90^\circ$); наоборот, при бесконечно большом трении правильное направление зубила — по касательной ($\varphi = 90^\circ$ и $\rho = 0$).

Для определения наивыгоднейшего угла приложения разрушающей силы, очевидно, необходимо определение коэффициента трения и угла трения. Определение силы трения под торцом дробовой коронки произведено на стенде, принципиальная схема которого приведена на фиг. 13.



Фиг. 13

- 1 Коронка
- 2 Штупф породы
- 3 Стол
- 4 Подшипники стола
- 5 Динамометр

Сила трения, возникающая при вращении коронки, стремилась привести во вращение штупф породы 2 вместе со столом 3. Стол 3 удерживался от вращения силою пружины динамометра 5, связанного со столом охватывающей струной. Момент трения между коронкой и породой $M_{тр} = P_{дин} \cdot R_{стола}$.

С другой стороны, момент трения будет равен $M_{тр} = f \frac{r_1 + r_2}{2} c$,

где f — искомый коэффициент трения, r_1 и r_2 — наружный и внутренний радиусы коронки, c — нагрузка на коронку.

Определения $f = \operatorname{tg} \varphi$ производились при следующих условиях: коронка — $r_1 = 24,5$ и $r_2 = 19,5$; $R_{стола} = 92,5$; число оборотов коронки — $n = 20$ об/мин; промывка — водой; крупность частиц дробы до 1 мм; порода — крупнозернистый роговообманковый гранит. Результаты определения представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Показания динамометра, кг	Нагрузка на коронку, кг	Коэффициент трения	Угол трения в град.
0,25	10,37	0,103	6
0,33	13,12	0,106	6
0,40	13,12	0,128	7
0,50	16,37	0,128	7
0,70	18,62	0,158	9

Полученные значения коэффициентов трения и основное положение о наиболее выгодном значении угла приложения разрушающей силы подтверждены другими опытами, которые будут изложены в следующем разделе.

Зависимость скорости углубки от давления на коронку

Во всех работах, посвященных решению вопроса о влиянии давления на скорость углубки скважины, приводится график зависимости, представляющий кривую с характерным максимумом при некотором оптимальном давлении. Максимум объясняется различными авторами по-разному: одни [3] считают, что при давлении выше оптимального происходит „слишком быстрое раздавливание дробы, вследствие чего снижается скорость углубки“; другие [9] считают, что при давлении на коронку выше оптимального дробь раскалывается и перестает работать (так как работает только круглая дробь); третьи [4] считают, что дробь выдавливается из-под торца коронки и углубка скважины прекращается. На наш взгляд дело обстоит иначе. Оптимальное давление создается условиями, наиболее близко отвечающие требованию наиболее выгодного приложения силы ($\rho = 90 - \varphi$) и обеспечивающие максимальную углубку¹⁾. Схема сил, отвечающая этим условиям, представлена на фиг. 11.

Из схемы следует, что $P_{sp} = A + fC = \operatorname{ctg} \rho \cdot C + \operatorname{tg} \varphi \cdot C$, но $\rho = 90 - \varphi$ и $\operatorname{ctg} \rho = \operatorname{tg} \varphi$, тогда $P_{sp} = 2 \operatorname{tg} \varphi \cdot c$, или

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_{sp}}{2C}.$$

Лабораторные определения $\operatorname{tg} \varphi$ из условий бурения на различных числах оборотов дали следующие значения:

при $n = 380$ об/мин,	$\operatorname{tg} \varphi = 0,127$,	$\varphi = 7^\circ$,
при $n = 240$ об/мин,	$\operatorname{tg} \varphi = 0,129$,	$\varphi = 7^\circ$,
при $n = 160$ об/мин,	$\operatorname{tg} \varphi = 0,157$,	$\varphi = 9^\circ$,
при $n = 90$ об/мин,	$\operatorname{tg} \varphi = 0,127$,	$\varphi = 7^\circ$,

что хорошо увязывается со значениями φ , полученными непосредственно (таблица 1).

Из опытов следуют интересные выводы, имеющие большой практический интерес. Если изменится коэффициент трения, то должно измениться положение максимума и значение оптимального давления. И действительно, при бурении с подсыпкой дробы давление было увеличено до 40 кг/см^2 , и еще максимум не был достигнут (фиг. 7, пунктирная линия). Точно такое же явление наблюдается при бурении стальной сечкой. Коэффициент трения под торцом коронки при бурении стальной сечкой меньше, что позволяет увеличивать давление на коронку и достигать больших скоростей углубки.

Второй вывод, который следует из рассмотрения графика, представленного на фиг. 7, может быть сформулирован так: для каждого числа оборотов коронки имеется свое оптимальное давление, причем значение его закономерно убывает с увеличением числа оборотов.

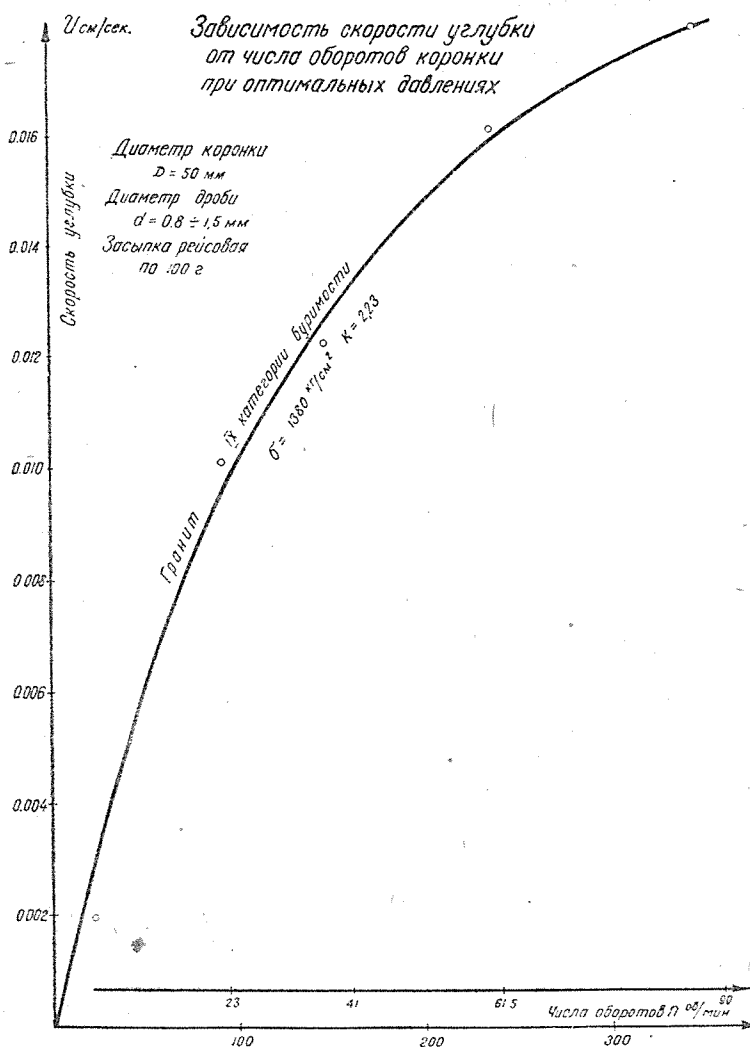
Зависимость скорости углубки от числа оборотов

Результаты исследования влияния числа оборотов коронки на скорость углубки приводятся различными авторами [1, 9 и др.], причем одни исследователи считают, что скорость углубки прямо пропорциональна числу

¹⁾ Более детальное рассмотрение этих взглядов приводится в статье И. С. Митюшкина и В. И. Молчанова (см. настоящий сборник, стр. 78).

оборотов коронки [1], другие [9] приводят данные, по которым видно, что увеличение числа оборотов на 280% увеличивает скорость углубки на 450%.

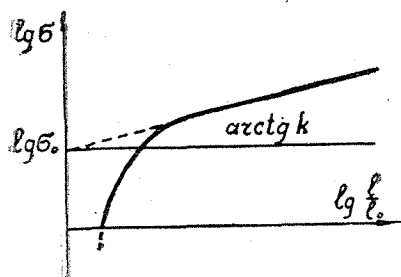
Наши исследования, приведенные в самых различных условиях, дают иную картину этой зависимости. Экспериментальное бурение в производственных условиях показало, что увеличение скорости углубки не находится в прямой пропорции от числа оборотов коронки, если сравнивать скорости углубки при оптимальных давлениях. Специальные испытания, проведенные в лабораторных условиях, позволяют довольно определенно говорить об общей закономерности изменения скорости углубки в связи с изменением числа оборотов. Эта зависимость выражается кривой параболического порядка (график на фиг. 14 и 15).



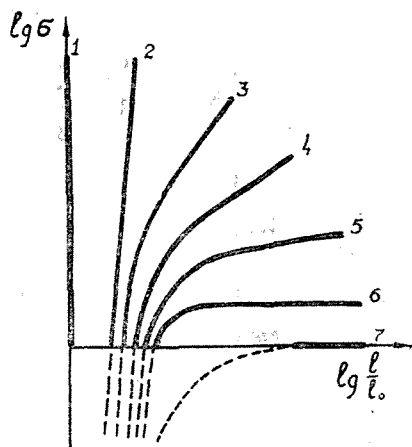
Фиг. 14

Полученные результаты дают возможность вычислить показатель степени k , характеризующий зависимость скорости углубки от числа оборотов. Показатель степени k является константой горной породы, поэтому на способах его определения мы остановимся ниже, после рассмотрения сопротивления горных пород бурению.

Уравнение политропы в логарифмических координатах (фиг. 16) представляет прямую линию, наклоненную под углом, тангенс которого равен k , и отсекающую при своем продолжении на оси напряжений условный предел текучести σ_0 .



Фиг. 16.



Фиг. 17. 1 Абсолютно твердое тело. 2 Идеальное упругое тело. 3 Упруго-хрупкое тело. 4 Упруго-пластичное тело. 5 Пластичное тело. 6 Реальная жидкость. 7 Идеальная жидкость

Все материалы, в том числе и горные породы, способны течь, но степень текучести их различна. Политропы различных материалов схематично изображены на фиг. 17. Деформации горных пород должны отражаться политропой, прямая часть которой наклонена под углом $40-70^\circ$, что соответствует показателям $k = 0,7-2,75$. Чем больше показатель степени политропы, тем меньше способность материала к пластическим изменениям. Сопротивление горных пород сжатию и степень текучести можно определить при сжатии образцов на прессе Гагарина, что является первой задачей наших дальнейших исследований. Показатель политропы (k) также определен нами из условий бурения, пользуясь общей формулой скорости углубки, выведенной ниже.

Вывод общей формулы, связывающей основные параметры режима

В литературе имеется несколько формул, связывающих параметры бурения с мощностью станка или производительностью бурения, выведенных для алмазного бурения или для бурения твердыми сплавами [2, 5]. Нами также сделана попытка на основе изложенных взглядов вывести уравнение зависимости скорости углубки от основных параметров режима дробового бурения.

Введем необходимые обозначения:

- K_c — сопротивление породы разбуриванию (кг/см^2),
- Δh — углубка за один оборот коронки (см),
- R — радиус скважины (см),
- r — радиус керна (см),
- n — число оборотов коронки в минуту (об/мин),
- U — скорость углубки скважины (см/сек),
- C — нагрузка на коронку (кг).

Работа по разрушению породы, совершаемая коронкой за один оборот, равна:

$$\Delta W = \pi(R^2 - r^2) K_c \Delta h. \quad (1)$$

Секундная работа равна:

$$W_{сек} = \pi(R^2 - r^2) K_c h_{сек}, \quad (1a)$$

но секундная работа—мощность, а секундная углубка есть скорость углубки, тогда

$$N = \pi(R^2 - r^2) \cdot K_c U. \quad (2)$$

Определим крутящий момент на торце коронки:

$$M_{кр} = \frac{71620 \pi (R^2 - r^2) K_c U}{n \cdot 100 \cdot 75}. \quad (3)$$

После деления на средний радиус $\left(\frac{R+r}{2}\right)$ и вычисления коэффициентов получаем выражение горизонтальной составляющей силы, производящей разрушение

$$P_p = \frac{60}{n} K_c U (R - r). \quad (4)$$

Заменим разность радиусов скважины и керна шириной кольцевого забоя $(R - r = b)$ и получим:

$$P_p = \frac{60}{n} K_c U b (\kappa \Gamma). \quad (4a)$$

Сопротивление породы разбуриванию (K_c) как сложное сопротивление двум видам деформации с достаточной точностью определяется уравнением [2].

$$K_c \Delta h = \sigma_{сж} \Delta h^k,$$

где $\sigma_{сж}$ —предельное сопротивление пород сжатию, Δh —абсолютная деформация, k —показатель полнотропы. Вполне уместно предположить, что время деформации изменяется в той же степени k , тогда $K_c U = \sigma_{сж} U^k$, и уравнение (4a) представляется в таком виде:

$$P_p = \frac{60}{n} \sigma_{сж} U^k b (\kappa \Gamma). \quad (5)$$

Кроме этой силы, в том же направлении будет действовать сила трения $F_{тр}$, которая определяется делением момента трения кольцевой пяты на средний радиус. Момент трения приработавшейся кольцевой пяты выражается [7]:

$$M_{тр} = f \frac{r_1 + r_2}{2} C,$$

где f —коэффициент трения,

r_1 и r_2 —внутренний и наружный радиусы пяты (коронки),

C —нагрузка на пята (на коронку) кг.

При делении на средний радиус получаем силу трения

$$F_{тр} = f C \kappa. \quad (6)$$

Суммируем реактивные силы, выраженные равенствами (5) и (6),

$$P_{общ} = P_p + F_{тр} = \frac{60}{n} \sigma_{сж} U^k b + f C (\kappa \Gamma) \quad (7)$$

Активная сила, развиваемая двигателем станка и приложенная к коронке, должна быть равна сумме реактивных сил.

$$P_{вр} = P_{общ} = P_p + F_{тр}, \text{ а } P_{вр} = \frac{M_{кр}}{r_{ср}} \eta, \quad (8)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент на шпинделе станка (кг. см),
 η — к.п.д. колонны штанг ($M_{кр}\eta$ — крутящий момент, приложенный к коронке),
 $r_{ср}$ — средний радиус коронки.

Прежде чем приравнивать вращающую силу к сумме реактивных сил, необходимо ввести еще один коэффициент. Оценивать работу бурового инструмента по фактически произведенной работе разрушения можно, зная коэффициент полезного действия инструмента. Введем к.п.д. дроби (η_p) и приравняем активную силу сумме реактивных:

$$\frac{M_{кр}}{r_{ср}} \eta = \frac{60 \sigma_{сж} U^k b}{n \eta_p} + fC \quad (9)$$

или

$$U^k = \frac{n \eta_p}{60 \sigma_{сж} \cdot b} \cdot \left(\frac{M_{кр}}{r_{ср}} \eta - fC \right). \quad (9a)$$

Проанализируем полученную формулу. Скорость углубки пропорциональна числу оборотов, но показатель степени k , зависящий от свойств породы, существенно изменяет характер зависимости и только в частном случае ($k=1$) скорость углубки прямо пропорциональна числу оборотов. Для вязких пород ($k < 1$) увеличение числа оборотов чрезвычайно эффективно: для хрупких пород, в которых главным образом и происходит дробовое бурение, увеличение числа оборотов увеличивает скорость углубки, но не прямо пропорционально.

Скорость углубки тем больше, чем больше к.п.д. забойного инструмента, то есть, чем крупнее отделяемые частицы породы и чем меньше работы тратится на повторное дробление, диспергирование материала.

Скорость углубки тем меньше, чем прочнее порода.

Скорость углубки уменьшается с увеличением ширины кольцевого забоя.

Выражение, стоящее в скобках, определяет сцепленность инструмента с породой. Закон изменения ее неизвестен, но многочисленная проверка вычислением, проведенным по самым различным данным, показывает, что при оптимальном давлении¹⁾ на коронку существует следующая зависимость:

$$\frac{M_{кр}}{r_{ср}} \eta = 2fC_{опт}.$$

Это означает, что сцепленность дроби с породой при оптимальном давлении численно равна силе трения. Общая сила, тормозящая коронку, при оптимальном давлении равна удвоенной силе трения, измеренной при полном отсутствии углубки скважины. Изучение характера изменения сцепленности инструмента с породой является ближайшей нашей задачей.

Определение показателя политропы и другие примеры пользования уравнением

Пользуясь результатами экспериментального бурения, мы подсчитали показатель политропы для гранита. В лабораторных условиях при постановке условий опыта формулу (9a) можно упростить, считая, что:

$$\frac{\eta_p}{60 \sigma_{сж} b} = B = \text{const.}$$

¹⁾ Оптимальное давление на коронку — это такое давление, при котором наблюдается самая интенсивная углубка скважины.

Решаем систему уравнений:

$$U_1^k = n_1 B \left(\frac{M_{кр1}}{r_{ср}} - f C_1 \right);$$

$$U_2^k = n_2 B \left(\frac{M_{кр2}}{r_{ср}} - f C_2 \right);$$

$$U_3^k = n_3 B \left(\frac{M_{кр3}}{r_{ср}} - f C_3 \right).$$

Необходимые данные для решения этих уравнений берем из опыта (фиг. 7).

$U_1 = 0,0183 \text{ см/сек},$	$\frac{M_{кр1}}{r_{ср}} = 31,5 \text{ кг},$	$C_1 = 124 \text{ кг},$
$U_2 = 0,0160 \text{ см/сек},$		$C_2 = 142 \text{ кг},$
$U_3 = 0,0105 \text{ см/сек},$		$C_3 = 180 \text{ кг},$
$f = 0,130,$	$\frac{M_{кр2}}{r_{ср}} = 36,0 \text{ кг},$	
$n_1 = 380 \text{ об/мин},$		
$n_2 = 240 \text{ об/мин},$	$\frac{M_{кр3}}{r_{ср}} = 46,2 \text{ кг},$	
$n_3 = 96 \text{ об/мин},$		

В результате вычислений получаем следующие значения:

$$k_1 = 1,82, \quad k_2 = 2,1, \quad k_3 = 1,68. \quad \text{Среднее из которых } k_{ср} = 1,87.$$

Следует еще раз обратить внимание на соотношение силы трения и общей вращающей силы, приложенной к торцу коронки, во всех случаях сила трения (без учета сцепления) равна половине общей силы или сцепленность равна силе трения.

Проверка на экспериментальных буровых скважинах различной глубины подтвердила это соотношение: во всех случаях $f \cdot C_{опт}$ составляет половину вращающей силы.

Следовательно, оптимальное давление на коронку может быть выражено двояко:

$$C_{опт} = \frac{60 \sigma_{сжс} U^k b}{n f \eta \rho}, \quad (10)$$

$$C_{опт} = \frac{M_{кр} \eta}{2 r_{кр} f}. \quad (11)$$

После завершения исследований можно будет воспользоваться уравнением (10) для определения оптимальных параметров режима, а уравнением (11) — для определения мощности привода бурового станка.

По графику зависимости скорости углубки от числа оборотов с учетом технических возможностей бурового оборудования находим оптимальное число оборотов коронки ($n_{опт}$) и соответствующую скорость углубки (U) в породах данной категории (при определенных $\sigma_{сжс}$ и k).

Подставляем значения $n_{опт}$ и U в уравнение (10) и находим оптимальное давление на коронку при бурении чугуновой или стальной дробью (в зависимости от качества дробы изменится коэффициент трения).

По уравнению (11) определим крутящий момент на торце коронки и после умножения на к.п.д. колонны штанг найдем крутящий момент на шпинделе бурового станка.

Выводы

1. Представления о характере работы дробы, как режущего инструмента или как раздавливающего, не объясняют многих фактов, известных из практики бурения, и не дают основания для научной разработки режимов дробового бурения.

2. Ведущиеся на основе новой гипотезы исследования сопротивления породы разбуриванию и выявления основных параметров режима на скорость углубки позволяют в первом приближении решать вопрос об оптимальных режимах дробового бурения и открывают перспективу дальнейшего совершенствования его. На данном этапе исследований можно утверждать следующее:

1) оптимальное давление на коронку не соответствует пределу прочности дробы, зависит от числа оборотов коронки и изменяется с изменением крупности дробовых частиц, их формы, а также материала коронки и дробы, то есть зависит от факторов, определяющих коэффициент трения;

2) зависимость скорости углубки от числа оборотов выражается кривой $U^k = Ln$, причем показатель степени k зависит от горной породы и определяется как степень пластичности ее;

3) буримость породы — сопротивление породы разбуриванию — определяется прочностью ее, выражающейся через критическое сопротивление сжатию, и пластичностью породы, выражающейся через показатель степени пластичности. Первое показывает, насколько прочно связаны между собой материалы, слагающие породу, второе характеризует способность породы к пластическим перестроениям — способность породы течь.

3. Выведенное уравнение общей зависимости скорости углубки от основных параметров режима в известной степени эмпирично, но в какой-то мере отражает характер технологического процесса, и после составления необходимых диаграмм позволит правильно задавать режим бурения в конкретных геологических и технических условиях.

4. Классификация пород по бурению, которая в настоящее время основывается на хронометражных наблюдениях и субъективной оценке прочности пород, может быть произведена на основе объективной оценки буримости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Е. В. Работа дробы как истирающего материала. Журн. „Разведка недр“, № 13, 1934.
2. Воздвиженский Б. И. Буровая механика. Госгеолиздат, 1949.
3. Волков С. А. Технология дробового бурения. Свердловск, 1950.
4. Временная инструкция по дробовому бурению. Госгеолиздат, 1950.
5. Кузнецов А. В. Некоторые расчеты по колонковому бурению. Журн. „Разведка недр“, № 14, 1933.
6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. IV, Томск, 1947.
7. Коренько А. С. и Кремеништейн. Теория механизмов и машин. Гостехиздат, Киев, 1952.
8. Крагельский И. О трении несмазанных поверхностей. Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах. Доклады т. I, изд. АН СССР, 1939.
9. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолиздат, 1950.
10. Цимбаревич П. М. Механика горных пород. Углетехиздат, 1948.